На правах рукописи

ПОЛЮЩЕНКОВ ИГОРЬ СЕРГЕЕВИЧ

РАЗРАБОТКА БЕЗДАТЧИКОВОГО ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва 2013

Работа выполнена на кафедре «Электромеханические системы» филиала федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске

Научный руководитель	доктор технических наук, доцент Льготчиков Валерий Вениаминович
Официальные оппоненты	Первый проректор по учебной работе ФГБОУ ВПО «РГАЗУ» доктор технических наук, профессор Литвин Валерий Иванович; Заведующий кафедрой автоматизированного электропривода ФГБОУ ВПО НИУ «МЭИ» кандидат технических наук, доцент Анучин Алексей Сергеевич
Ведущая организация	ФГБОУ ВПО «Тверской Государственный технический университет»

Защита диссертации состоится «22» ноября 2013 года в 14 час. 00 мин. в аудитории М-611 на заседании диссертационного совета Д 212.157.02 при Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу: 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д.14, корп. М.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «НИУ МЭИ».

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направить по адресу: 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д.14, Ученый Совет ФГБОУ ВПО НИУ «МЭИ»

Автореферат разослан “21“ октября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.157.02
канд.техн.наук, доцент Цырук С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Вентильно-индукторный электропривод (ВИП) перспективен для широкого круга применений. По сравнению с электроприводами (ЭП) постоянного тока, асинхронными или синхронными ЭП ВИП имеет простой, надёжный и дешёвый электродвигатель с широкими функциональными возможностями и высокими энергетическими показателями, а также простой и надёжный коммутатор на современной элементной базе.

Устранение датчика положения ротора (ДПР) из системы управления (СУ) ВИП позволяет упростить конструкцию, снизить стоимость и повысить надёжность ЭП. Однако в ряде случаев при этом снижается точность и диапазон регулирования, что не препятствует применению бездатчиковых ЭП в установках, допускающих это по технологическим требованиям.

Переход к бездатчиковым системам управления является общепринятой тенденцией развития регулируемых электроприводов. В зарубежной литературе ВИП более известен под названием SRD (Switched Reluctance Drive). Широкую известность получили работы по ВИП таких авторов, как P.P. Acarnley, P.C. Kjaer, G. Gallegos-Lopez, J.P. Lyons, S.R. MacMinn, T.J.E. Miller и др. Значительный вклад в развитие ВИП наряду с зарубежными специалистами внесли отечественные учёные Н.Ф. Ильинский, М.Г. Бычков, Л.Ф. Коломейцев и др.

Применение классических методов идентификации и управления требует известных значений параметров, входящих в математическое описание, а также известной структуры математического описания объекта управления. Однако в ходе технологического процесса параметры и структура объекта управления могут изменяться. Такой способ регулирования, как нейрорегулирование, относится к категории интеллектуальных систем управления и позволяет реализовать любой требуемый нелинейный алгоритм управления, не имея описания объекта, создавать адаптацию, обеспечивать робастность при нестабильности параметров.

Способность искусственных нейронных сетей (ИНС) к аппроксимации сложных нелинейных зависимостей и устойчивость к изменению параметров объекта управления делает их привлекательными для решения задач управления.

Системы управления ЭП с ИНС требуют программно-аппаратную реализацию, которая выполняется на современных контроллерах с использованием широкого набора отладочных средств, внутрисхемных отладчиков и эмуляторов. Высокопроизводительные контроллеры делают задачи управления, ранее решённые только теоретически, прикладными в широком смысле этого слова.

В промышленности есть большой класс устройств и механизмов, использующих нерегулируемый ЭП, где эффективность существенно возрастает при использовании регулируемого электропривода. К таким устройствам прежде всего относятся нагнетатели, а именно, центробежные

насосы, компрессоры и вентиляторы. Регулирование производительности нагнетателей посредством регулирования скорости является наиболее экономичным, а применение регулируемого ЭП в таких установках вместо нерегулируемого имеет перспективу.

Одним из возможных направлений внедрения ВИП является их использование в компрессорных, вентиляционных, насосных установках, а также в установках для подачи воздуха и газа, где традиционно используются нерегулируемые асинхронные электроприводы. По сравнению с электроприводами постоянного тока, асинхронными и синхронными электроприводами ВИП имеет следующие преимущества:

1. Высокая технологичность и низкая трудоёмкость производства двигателя;
2. Упрощенная и более надежная по сравнению с преобразователем частоты для асинхронного электропривода схема и конструкция силового преобразователя;
3. Высокие энергетические показатели;
4. Высокая надежность привода в целом.

Сказанное позволяет сделать вывод об актуальности и практической значимости научной задачи разработки и исследования бездатчикового ВИП с искусственной нейронной сетью.

Цель диссертационной работы. Разработка и исследование системы бездатчикового управления ВИП на основе оригинального алгоритма идентификации положения ротора ВИМ с использованием математического аппарата дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и искусственных нейронных сетей. Техническая реализация комплекса программно-аппаратных средств микропроцессорной системы управления бездатчикового ВИП нагнетателя.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **задачи:**

1. Анализ существующих способов бездатчикового управления ВИП.
2. Анализ особенностей функционирования электроприводов нагнетателей.
3. Разработка и апробация алгоритма идентификации углового положения ротора ВИМ на основе математического аппарата дискретного преобразования Фурье и искусственных нейронных сетей.
4. Разработка и экспериментальная проверка алгоритма настройки идентификатора углового положения ротора ВИМ при изменении питающего напряжения и уровня токоограничения, а также настройка на различные конфигурации ВИМ без изменения настройки ДПФ и ИНС.
5. Составление компьютерной модели разработанного бездатчикового ВИП и проверка её соответствия реальной системе управления ВИП.
6. Применение разработанного алгоритма идентификации в замкнутой системе стабилизации частоты вращения ВИП и его экспериментальная проверка.

7. Разработка и изготовление программно-аппаратных средств для реализации результатов исследования и проверка предложенного алгоритма идентификации и управления на экспериментальной установке.

Научная новизна:

1. Разработан алгоритм идентификации углового положения ротора ВИМ на основе математического аппарата дискретного преобразования Фурье и искусственных нейронных сетей. Разработана и апробирована система бездатчикового управления ВИП на основе предложенного алгоритма идентификации положения ротора ВИМ.

2. Определены параметры ДПФ и ИНС для выполнения требований к точности идентификации углового положения ротора ВИМ для предложенного алгоритма идентификации.

3. Установлено, что предложенный алгоритм идентификации позволяет снизить вычислительные затраты при микропроцессорной реализации по сравнению с известными алгоритмами идентификации с использованием ИНС.

4. Показано, что для настройки идентификатора углового положения ротора ВИМ при изменении величины питающего напряжения и уровня токоограничения не требуется изменение настройки ДПФ и ИНС. Предложен способ настройки идентификатора на различные конфигурации ВИМ без изменения настройки ДПФ и ИНС.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались:

1. Теория электропривода и теория автоматического управления.

2. Методы имитационного моделирования.

3. Элементы теории искусственных нейронных сетей и цифровой обработки сигналов.

4. Элементы теории планирования эксперимента.

5. Компьютерные методы интерактивной отладки и исследования микропроцессорных систем управления с использованием интегрированной среды разработки.

6. Экспериментальные исследования.

Объектом исследования является вентильно-индукторная машина (ВИМ) в составе ВИП, а также микропроцессорная система управления ВИП.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждается результатами экспериментальной проверки и результатами компьютерного моделирования, полученными при обоснованных допущениях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Структура системы бездатчикового управления ВИП, обеспечивающая идентификацию углового положения ротора ВИМ, регулирование электромагнитного момента, стабилизацию частоты вращения и адаптацию к изменению напряжения питания и уровня токоограничения.

2. Алгоритм идентификации углового положения ротора ВИМ на основе математического аппарата ДПФ и ИНС, ориентированный на снижение вычислительных затрат микроконтроллера по объёму вычислений ИНС.

3. Алгоритм адаптации идентификатора углового положения ротора ВИМ при изменении величины питающего напряжения и уровня токоограничения без изменения настройки ДПФ и ИНС. Настройка идентификатора на различные конфигурации ВИМ без изменения настройки ДПФ и ИНС.

4. Структура организации программного обеспечения микроконтроллера для реализации бездатчикового управления ВИП с использованием математического аппарата ДПФ и ИНС для идентификации углового положения ротора ВИМ.

Основные практические результаты диссертации: Разработана система бездатчикового управления ВИП с использованием оригинального алгоритма идентификации положения ротора ВИМ для электроприводов агрегатов нагнетателей с настройкой на конкретный тип ВИМ.

Реализация результатов работы. Теоретические положения и результаты экспериментальных исследований использованы в учебном процессе филиала ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, а именно:

- в лекционном курсе «Электроприводы с вентильными и шаговыми двигателями» программы подготовки специалистов 140604 – «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов».

- в лекционном курсе «Применение вычислительной техники в задачах электропривода» программы подготовки бакалавров 140600 – «Электротехника, электромеханика и электротехнологии».

- в лекционном курсе «Микропроцессорные системы управления» программы подготовки бакалавров 140600 – «Электротехника, электромеханика и электротехнологии».

- в экспериментальном стенде «Вентильно-индукторный электропривод» для НИР студентов и аспирантов.

Результаты работы применены в ЭП канальной вентиляции на НПО «Рубикон-Инновация» в г. Смоленске.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 14-й МНТК студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2008 г.), 5-й, 6-й, 7-й, 8-й Межрегиональных науч.-техн. конференций студентов и аспирантов (г. Смоленск, 2008, 2009, 2010, 2011 г. соотв.), а также на заседании кафедры «Электромеханические системы» филиала МЭИ в г. Смоленске. На региональном конкурсе научно-технического творчества молодежи «НТТМ-Смоленск 2012» работа была удостоена диплома I степени в номинации «Лучший проект в области технических наук»

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти основных глав, заключения, списка литературы, включающего 96 наименований, и приложений. Диссертация содержит 207 стр. машинописного текста, 93 рисунка, 18 таблиц и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, отражена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, даётся общая характеристика работы.

В первой главе кратко рассмотрены принцип действия ВИМ и структура ВИП. Указана особенность ВИП – дискретность управления в сочетании с нелинейностью магнитной системы.

Выполнен аналитический обзор научно-технической литературы, касающейся вопросов управления ВИП и применения ИНС в задачах управления. Кратко описаны свойства и области применения ИНС, а также особенности выбора их структуры.

Рассмотрено назначение ДПР в системе управления ВИП – осуществление позиционной обратной связи для синхронизации управляющих воздействий с положением ротора ВИМ. Дана характеристика существующих методов идентификации положения ротора ВИМ, в том числе и с использованием ИНС. Показано, что бездатчиковое управление ВИП основано на различных методах восстановления информации о положении ротора ВИМ по измеренным электрическим сигналам – токам и напряжениям фаз. Сравнение приведённых в работе способов идентификации показало, что у каждого из них имеются свои преимущества и недостатки. Методы идентификации различаются способом реализации, потребностью в измерительных цепях, рабочей зоной и способом организации вычислительного процесса.

ИНС, как правило, применяются в управлении бездатчиковыми ВИП для идентификации углового положения ротора ВИМ по мгновенным величинам тока, напряжения и потокосцепления. Такой подход к решению задачи требует значительного объёма вычислений за короткий интервал времени, определяемый дискретностью формирования фазных токов. Предложенный в работе алгоритм идентификации позволяет снизить вычислительные затраты и освободить ресурсы микроконтроллера для решения прочих задач.

Приведено сравнение предложенного алгоритма идентификации положения ротора ВИМ и указанного выше способа идентификации по следующим показателям: структура используемых данных, требуемая производительность микроконтроллера, структура ИНС, частота обновления информации. Сравнение показало, что предложенный метод ввиду использованной структуры данных и организации вычислительного процесса позволяет снизить вычислительные затраты микроконтроллера. Усложнение структуры ИНС при этом не требуется. Экономия вычислительных ресурсов достигается за счёт предварительного выделения интегральных составляющих (частотного образа) из сигнала фазных токов с использованием ДПФ. Применение ДПФ позволило перейти от мгновенных значений токов к интегральным составляющим за несколько последовательных коммутаций фаз. ИНС при этом задействуется также однократно для нескольких последовательных включений фаз ВИМ.

Однако предложенный алгоритм идентификации имеет недостаток – угловое положение идентифицируется в виде отклонения фактических углов включения фаз от контрольного положения (точек синхронизации), а не в непрерывном виде. Кроме того, частота обновления информации об угловом положении ротора зависит от частоты вращения ВИМ.

Во второй главе рассматривается организация бездатчикового управления ВИП на основе предложенного алгоритма идентификации положения ротора ВИМ.

Структура бездатчикового ВИП приведена на рис.1.

Система управления бездатчикового ВИП имеет контуры регулирования тока и частоты вращения, а также идентификатор углового положения ротора на основе ДПФ и ИНС. ДПФ используется для вычисления гармонических составляющих $I[k]$ сигнала фазных токов, характеризующих взаимное положение зубцов ротора и статора в моменты включения фаз. ИНС по гармоническим составляющим идентифицирует угловое положение ротора ВИМ.

Задающий сигнал $\omega_З$ – задание частоты вращения ротора ВИМ. По идентифицированному угловому положению ротора Θ_1^*, Θ_2^* вычисляется средняя частота вращения ротора за период коммутации двух соседних фаз. Регулятор скорости РС вычисляет требуемую величину электромагнитного момента ВИМ для стабилизации частоты вращения ротора ВИМ. Релейные регуляторы тока (РРТ) по заданному уровню токоограничения $I_з$, а также по углу включения $\Theta_{вкл}$ и углу отключения $\Theta_{откл}$ фаз задаёт фазные токи. Обратная связь по напряжению питания используется для настройки системы управления на его фактическую величину с помощью блока адаптации идентификатора (БА). Коммутатор реализует последовательную коммутацию фаз и формирует импульсы прикладываемого к фазам напряжения. Регулятор скорости, релейные регуляторы тока, идентификатор углового положения ротора и блок адаптации идентификатора реализованы программно с помощью микроконтроллера.

Управляющим воздействием на ВИМ является величина электромагнитного момента, для регулирования которого используется импульсная коммутация фаз (регулирование углов коммутации фаз). Для этого в фазах ВИМ с помощью блоков управления коммутацией БК1 – БК*n* (рис.1) в связанной с положением ротора последовательности формируются импульсные токи. Блок управления коммутацией вычисляет текущее положение ротора Θ по идентифицированному угловому положению ротора Θ_1^*, Θ_2^* в моменты включения фаз и частоте вращения. По требуемой величине электромагнитного момента вычисляется угол включения $\Theta_{вкл}$ и угол отключения $\Theta_{откл}$ фазы. Выбор между блоками БК1 – БК*n* выбирается в зависимости от фазы, которая должна вступить в работу. Угол включения фаз задаётся постоянным, а регулирование угла отключения обеспечивает изменение интервала ввода энергии в фазу, а следовательно, и величину электромагнитного момента.

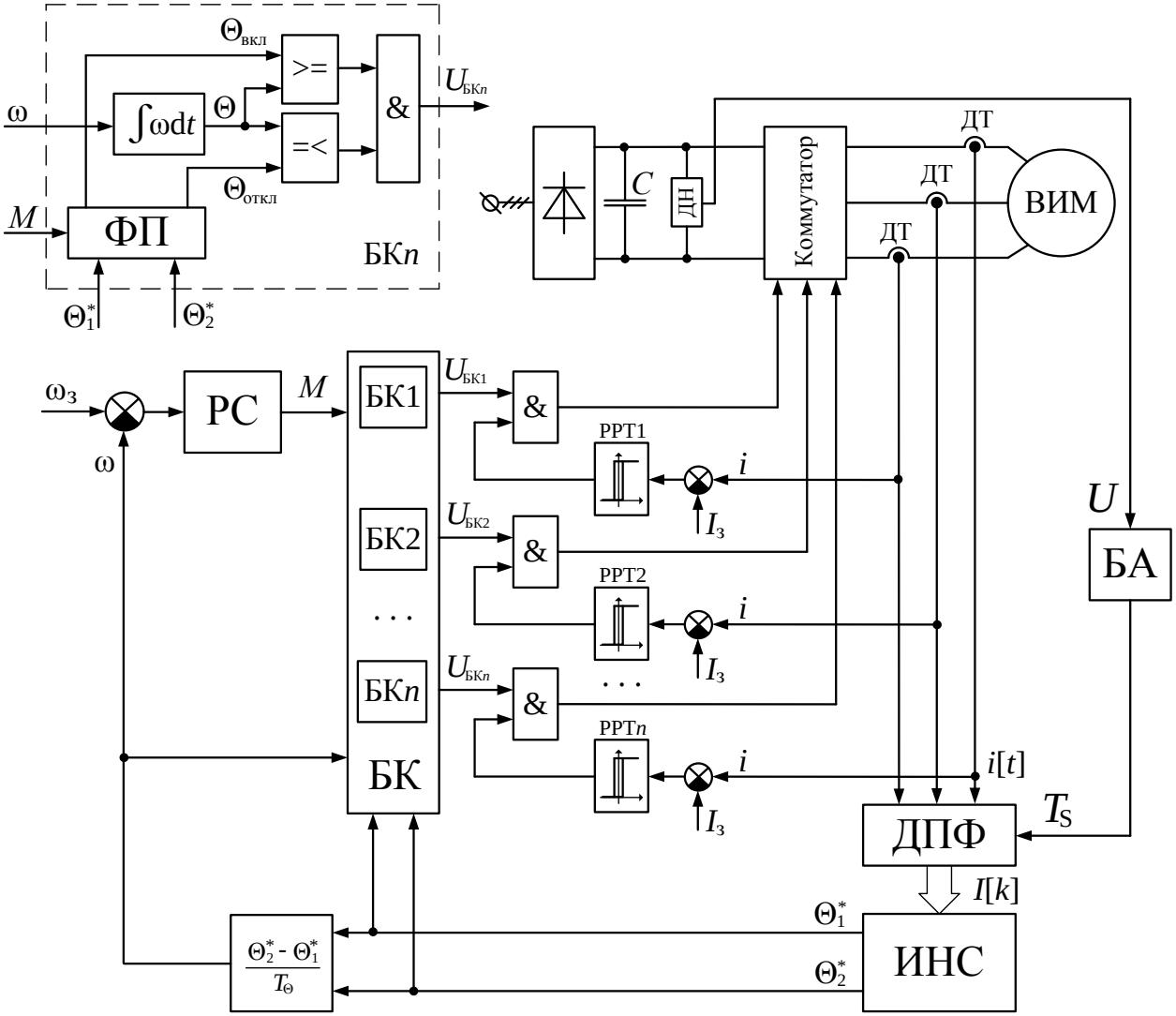

Рис.1. Структура бездатчикового ВИП: РС – регулятор скорости; РРТ – релейный регулятор тока; ИНС – алгоритм искусственной нейронной сети; ДПФ – алгоритм дискретного преобразования Фурье; ВИМ – вентильно-индукторная машина; БК – блок управления коммутацией; БА – блок адаптации идентификатора; ДН – датчик напряжения; ДТ – датчики тока; ФП – функциональный преобразователь; i[t] – массив отсчётов тока во временной области; I[k] – частотный образ; T_S – период дискретизации тока; T_Θ – период коммутации фаз; Θ_1^*, Θ_2^* – идентифицированное положение ротора ВИМ; $\Theta_{вкл}$, $\Theta_{откл}$ – углы включения и отключения фаз ВИМ; $I_з$ – уровень токоограничения

Чтобы пояснить предложенный способ идентификации углового положения ротора ВИМ, рассмотрим последовательность преобразования серии импульсов тока в гармонические составляющие (рис.2). Вследствие наличия двойной зубчатости фаза ВИМ имеет нелинейную зависимость индуктивности фаз от углового положения зубцов ротора по отношению к зубцам статора. При вращении ротора ВИМ необходима последовательная коммутация фаз так, чтобы в моменты коммутации сохранялась синфазность положения зубцов ротора относительно зубцов статора. При этом точкой синхронизации Θ_0 является рассогласованное положение зубцов статора и

ротора для данной фазы.

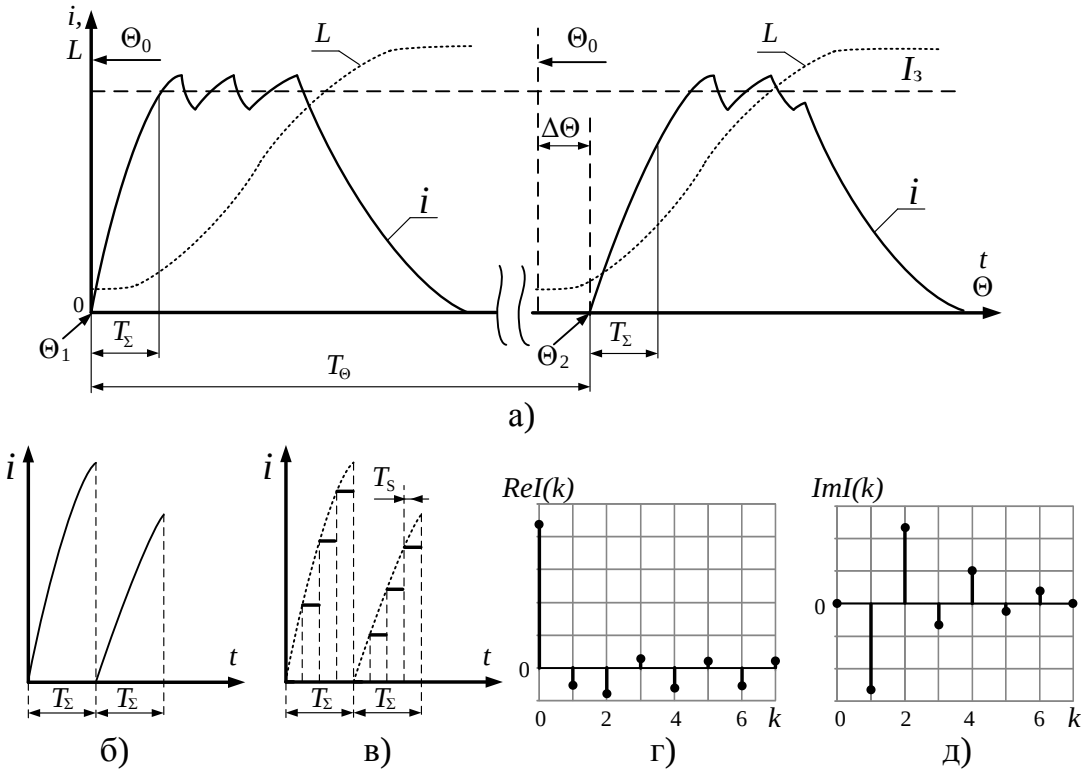

Рис.2. Вычисление частотного образа: а) исходная кривая тока; б) сигнал тока на измерительном участке; в) сигнал тока на измерительном участке в дискретном виде; г) действительные составляющие частотного образа ReI(k); д) мнимые составляющие частотного образа ImI(k); $2T_\Sigma$ – измерительный участок; T_Θ – период коммутации фаз; T_S – период дискретизации тока; $I_з$ – заданная амплитуда импульса тока (уровень токоограничения); k – точки спектра; Θ_0 – точка синхронизации; Θ_1, Θ_2 – углы включения фаз; $\Delta\Theta$ – отклонение угла коммутации от точки синхронизации

С момента коммутации до достижения током уровня токоограничения преобразователь работает в режиме источника напряжения. Начальный участок нарастания тока при коммутации фазы может рассматриваться как переходная функция, характеризующая электромагнитные параметры фазы ВИМ. В этом случае напряжение является входным воздействием, а ток фазы – это отклик, характеризующий индуктивность фазы при данном угловом положении ротора, а также активное сопротивление и ЭДС вращения. Переходная функция фазного тока ВИМ $i(t)$ используется для идентификации положения ротора ВИМ.

При идентификации углового положения ротора ВИМ используются два последовательных импульса фазных токов (рис.2,а). Из них выделяются начальные участки длительностью T_Σ и последовательно располагаются на временной оси (рис.2,б), образуя измерительный участок. Эта же временная последовательность на измерительном участке в дискретном виде показана на рис.2,в.

По данной кривой на измерительном участке с помощью ДПФ вычисляются гармонические составляющие токов. ДПФ ставит в соответствие

сигналу, представленному во временной области, его описание в частотной области:

$$I(k)=\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}i(n)e^{-j\frac{2\pi nk}{N}}=\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}i(n)\left[\cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right)-j\sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right)\right], \qquad (1)$$

где N – число точек ДПФ;

$I(k)$ – частотный выход ДПФ в k-той точке спектра;

$i(n)$ – n-ый отсчёт во временной области, который в общем случае может быть вещественным или комплексным.

При вычислении частотного образа определяются вещественные $\mathrm{Re}I(k)$ (рис.2,г) и мнимые $\mathrm{Im}I(k)$ (рис.2,д) точки спектра.

Совокупность гармонических составляющих $I[k]$, позволяющих системе управления отличить кривую нарастания тока $i(t)$ при одном угле включения от кривой нарастания тока при других углах включения, названа частотным образом.

Протяжённость измерительного участка $2T_\Sigma$ задаётся в зависимости от величины питающего напряжения и уровня токоограничения, что определяется блоком адаптации идентификатора. При этом протяжённость измерительного участка T_Σ связана с периодом дискретизации токов по соотношению:

$$T_\Sigma=\frac{N}{2}T_S. \qquad (2)$$

Участки поддержания и спада тока при вычислении ДПФ не используются. Таким образом, измерительный участок представляет собой два соседних и объединённых вместе интервала нарастания тока при включении соседних фаз протяжённостью $2T_\Sigma$ (рис.2,б).

Таким образом, осуществляется выделением информативных участков из сигнала тока во временной области и последовательное расположение их на временной оси.

Так как аналитическая зависимость между частотным образом и угловым положением ротора ВИМ в моменты включения фаз неизвестна, то для её аппроксимации применена ИНС. Зависимость между частотным образом и угловым положением ротора ВИМ аппроксимируется при обучении ИНС.

Идентифицированное угловое положение ротора ВИМ показывает, каким образом в моменты включения фаз были взаимно ориентированы зубцы статора и ротора. Таким образом, угловое положение идентифицируется в виде отклонения фактических углов включения фаз от точки синхронизации (рис.2,а) для двух последовательных коммутаций фаз на измерительном участке. Точкой синхронизации является рассогласованное положение зубцов статора и ротора для каждой из фаз.

В статическом режиме углы включения фаз соответствуют рассогласованному положению зубцов статора и ротора, т.к. система управления выполняет синхронизацию управляющих воздействий с положением ротора. Однако в динамике происходит отклонение от этого

состояния из-за динамического момента. Отклонение от синфазности устраняется путём стабилизации углов коммутации фаз относительно заданного значения.

Для экспериментального исследования алгоритма идентификации углового положения ротора использовалась ВИМ, имеющая число фаз m = 6, число зубцов ротора Z_P = 5, число зубцов статора Z_C = 12, индуктивность фаз при рассогласованном положении зубцов статора и ротора L_{min} = 5.0 мГн, индуктивность фаз при согласованном положении зубцов статора и ротора L_{max} = 12.0 мГн.

Экспериментально показано влияние углов включения фаз на гармонические составляющие частотного образа (рис.3). Кривые фазный токов показаны с учётом их преобразования по рис.2.

Определён набор гармонических составляющих, структура ИНС, а также число точек ДПФ во временной области (N в формуле (1)), при которых погрешность идентификации углового положения ротора ВИМ не превышает 7% от протяжённости участка полюсного деления ротора с dL/dΘ > 0 (таблица 1).

Показано, что требуемая точность идентификации достигается по трём характерным гармоническим составляющим частотного образа (ReI(0), ReI(1) и ImI(1) по рис.3).

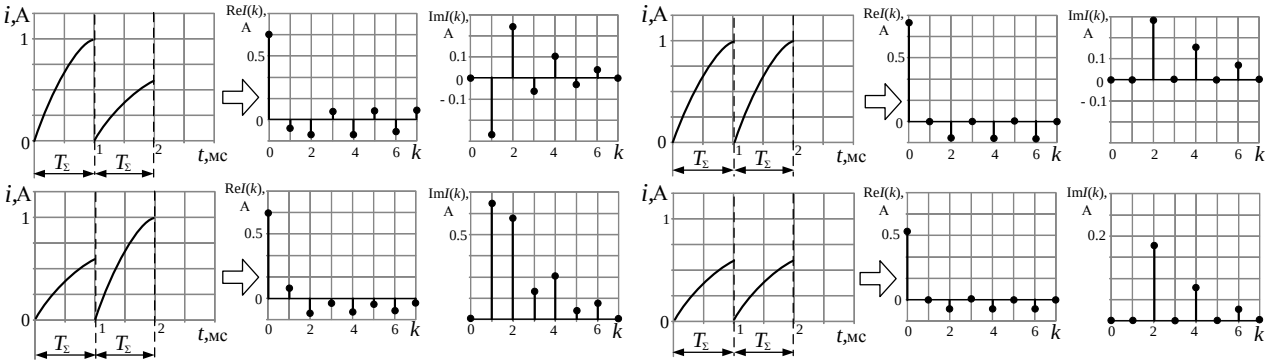

Рис.3. Экспериментальные частотные образы ВИМ при различных углах включения фаз и постоянном напряжении питания: ReI(k) – вещественные составляющие частотного образа; ImI(k) – мнимые составляющие частотного образа; 2T_Σ – измерительный участок; k – точки спектра

Таблица 1

Число точек ДПФ во временной области	8
Число частотных выходов ДПФ (число входов ИНС)	3
Число выходов ИНС	2
Число нейронов в скрытом слое ИНС	6-8

Число точек ДПФ во временной области (N в формуле (1)) определяет

ширину вычисляемого спектра. Для вычисления используемых при идентификации гармонических составляющих ReI(0), ReI(1) и ImI(1) принято N=8, т.к. указанные составляющие находятся в пределах вычисляемого при этом спектра (рис.3).

Также выбран тип ИНС – персептрон с одним скрытым слоем. ИНС имеет три входа и два выхода (рис.4,а). Число входов ИНС равно числу гармонических составляющих частотного образа ВИМ, по которым осуществляется идентификация углового положения ротора. ИНС имеет два выхода т.к. идентифицируются углы коммутации двух соседних фаз. При этом скрытый слой ИНС имеет 6-8 нейронов. Дальнейшее увеличение числа гармонических составляющих и числа нейронов в скрытом слое ИНС приводит к увеличению точности в пределах указанной погрешности.

На рис.4,б для оценки точности идентификации приведены зависимости между идентифицированными углами включения фаз ВИМ (Θ_1^* и Θ_2^* – выходы ИНС) и действительными углами включения фаз (Θ_1, Θ_2) на измерительном участке. При этом каждому сочетанию Θ_1 и Θ_2 соответствует частотный образ ВИМ. Зависимости, приведённые на рис.4,б, показывают, что при различных частотных образах (различных сочетаниях Θ_1 и Θ_2) отличие идентифицированного углового положения Θ_1^*и Θ_2^* от фактического Θ_1 и Θ_2 не превышает 7% протяжённости участка полюсного деления ротора с dL/dΘ>0.

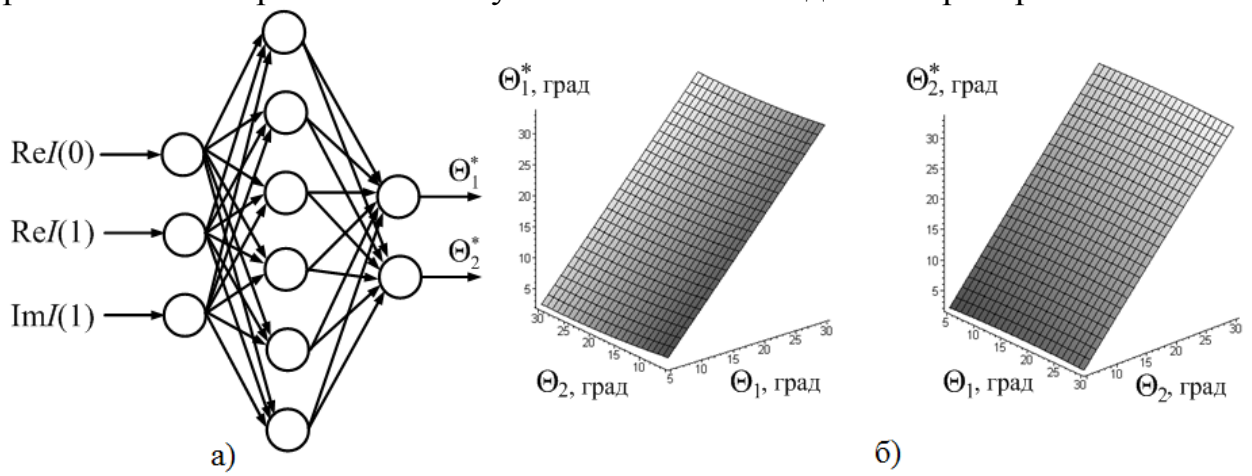

Рис.4. Алгоритм идентификации: а) Структура ИНС; б) Зависимость между идентифицированными углами включения фаз ВИМ (Θ_1^*, Θ_2^*) и действительными углами включения (Θ_1, Θ_2), аппроксимируемая ИНС (Каждому сочетанию Θ_1 и Θ_2 соответствует частотный образ ВИМ)

Рассмотрена задача адаптации идентификатора углового положения ротора ВИМ при изменении величины питающего напряжения и уровня токоограничения для ВИМ с известной конфигурацией. Показано, что решение данной задачи достигается при переходе то действительных величин токов и напряжений к относительным (нормированным). При этом изменение настройки ДПФ и ИНС не требуется, т.к. определение гармонических базисных функций ДПФ и весов и смещений ИНС осуществляется в процессе обучения

при нормированных токах и напряжениях, а следовательно, и нормированных частотных образах ВИМ.

Переход от действительных переменных к нормированным осуществляется с использованием коэффициентов масштаба, которые определяются автоматически в зависимости от фактической величины напряжения питания и уровня токоограничения.

Установлено, что при таком подходе к решению задачи упрощается процесс обучения ИНС, т.к. при этом фактор варьирования напряжения не учитывается, упрощается структура ИНС, т.к. напряжение в качестве входного сигнала не используется.

Показано, что при адаптации идентификатора углового положения ротора ВИМ с заданной конфигурацией к изменению напряжения питания и уровня токоограничения требуется изменение периода дискретизации тока T_S, что поясняется на рис.5,а и рис.6,а.

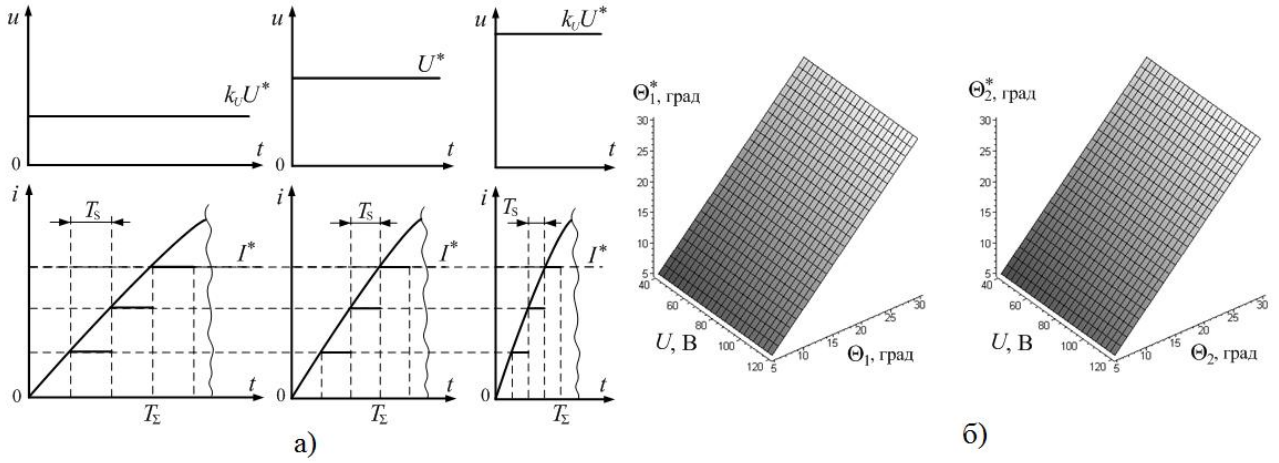

Рис.5. Адаптация идентификатора углового положения при изменении напряжения питания: а) Преобразование сигнала тока; б) Зависимость между идентифицированными углами включения фаз ВИМ (Θ_1^*, Θ_2^*) и действительными углами включения (Θ_1, Θ_2) при изменении напряжения питания U (Каждому сочетанию Θ_1 и Θ_2 соответствует частотный образ ВИМ)

Серия опытов при варьировании напряжения питания и углов включения фаз ВИМ показала, что погрешность идентификации углового положения ротора ВИМ не превышает 9% от протяжённости участка полюсного деления ротора с $dL/d\Theta>0$. Зависимости, приведённые на рис.5,б и рис.6,б, показывают, что при различных частотных образах (различных сочетаниях Θ_1 и Θ_2), варьировании напряжения питания в диапазоне 40 – 120В и уровня токоограничения в диапазоне 1.0 – 3.5А отличие идентифицированного углового положения Θ_1^* и Θ_2^* от действительного Θ_1 и Θ_2 не превышает 9% от протяжённости участка полюсного деления ротора с $dL/d\Theta>0$. Θ_1^* и Θ_2^* являются выходами ИНС (см. рис.4,а).

Рассмотрена настройка идентификатора углового положения ротора ВИМ на различные конфигурации ВИМ без изменения настройки ДПФ и ИНС. Эта

возможность достигается при переходе от нормированной зависимости $L_0(\Theta)$ к фактическим ($L_1(\Theta)$ или $L_2(\Theta)$), как показано на рис.7.

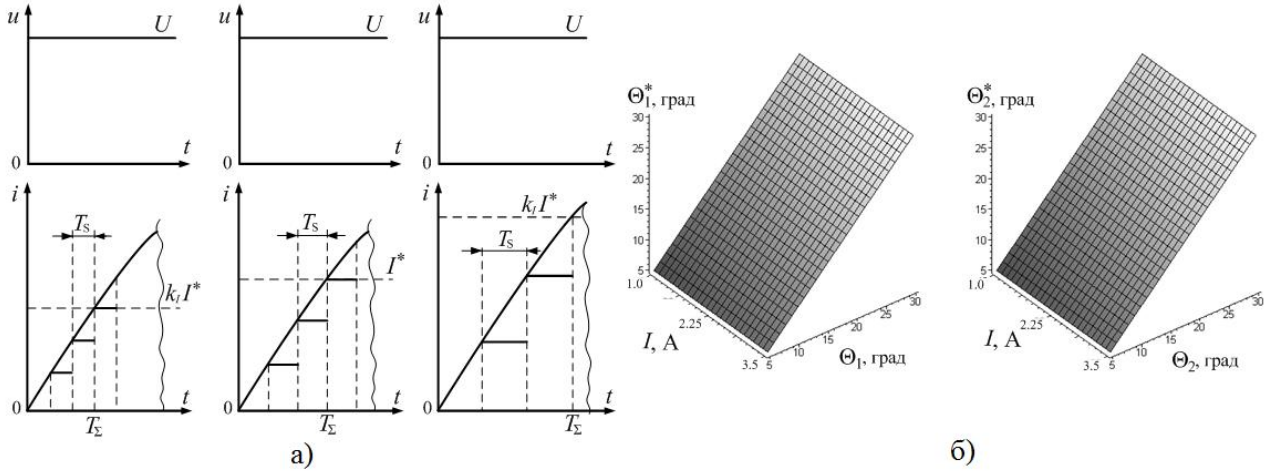

Рис.6. Адаптация идентификатора углового положения при изменении уровня токоограничения: а) Преобразование сигнала тока; б) Зависимость между идентифицированными углами включения фаз ВИМ (Θ_1^*, Θ_2^*) и действительными углами включения (Θ_1, Θ_2) при изменении уровня токоограничения I (Каждому сочетанию Θ_1 и Θ_2 соответствует частотный образ ВИМ)

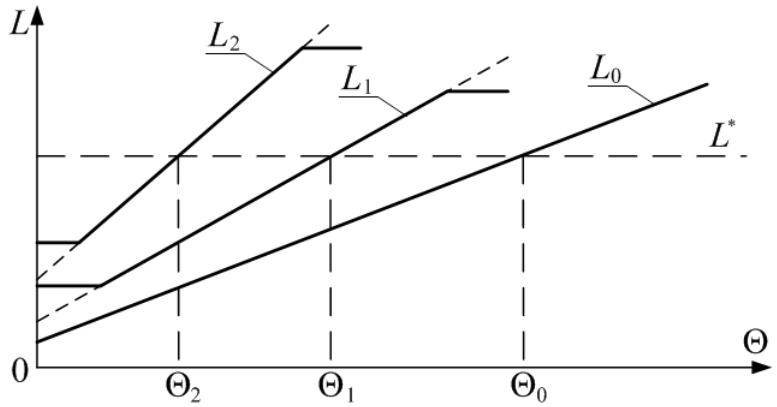

Рис.7. Переход от нормированной зависимости $L_0(\Theta)$ к фактическим $L_1(\Theta)$ и $L_2(\Theta)$ на интервале с $dL/d\Theta>0$

Переход от идентифицированного нормированного углового положения ротора Θ_0 к действительному значению Θ для ВИМ с конкретной конфигурацией осуществляется по формуле:

$$\Theta = \frac{k_0}{k}\Theta_0 + \frac{b_0 - b}{k}, \qquad (3)$$

где k_0, b_0 – коэффициенты нормированной зависимости $L_0(\Theta)$;

k, b, – коэффициенты линеаризованной зависимости $L(\Theta)$ для конкретной ВИМ.

<u>В третьей главе</u> приводятся результаты компьютерного моделирования бездатчикового ВИП.

Компьютерная имитационная модель составлена для проверки работоспособности предложенной системы бездатчикового управления ВИП. В модели воспроизводятся функциональные связи между переменными ВИМ и системы управления. В основу имитационной модели положены уравнения

электрического равновесия и электромеханического преобразования энергии для каждой из фаз, а также уравнение движения. Среди прочего учтена нелинейность характеристики магнитной системы и дискретность управления. Также воспроизводится последовательность сбора, передачи и обработки информации в процессе идентификации и управления. Для моделирования бездатчикового ВИП использована система компьютерной математики *MATLAB* и её расширения *SIMULINK*, *DIGITAL SIGNAL PROCESSING*, *NEURAL NETWORK BLOKSET* и *NEURAL NETWORK TOOLBOX*. Произведено моделирование отработки системой бездатчикового ВИП управляющего и возмущающего воздействий. Показана адекватность математической модели идентификатора положения и его микропроцессорной реализации.

В четвёртой главе приведена реализация результатов диссертационной работы и результаты экспериментального исследования бездатчикового ВИП.

Для экспериментального исследования бездатчикового ВИП, проверки адекватности разработанного алгоритма идентификации и управления разработана экспериментальная установка «Вентильно-индукторный электропривод». Приведены данные экспериментального оборудования.

Для микропроцессорной системы управления ВИП с микроконтроллером PIC18F2320 фирмы Microchip разработано программное обеспечение (ПО).

Предложена модульная структура организации ПО системы управления ВИП, выполняющей функции идентификации и управления. Программное обеспечение условно разделено на три блока (рис.8) в зависимости от выполняемых функций, приоритета выполнения и использования программно-аппаратных ресурсов микроконтроллера.

Подробно рассмотрена организация отдельных наиболее важных модулей ПО и порядок взаимодействия программных модулей между собой.

Показана диаграмма взаимодействия программных модулей в режиме реального времени, определяющая распределение программно-аппаратных ресурсов микроконтроллера при сборе и обработке информации, а также решении задач управления (рис.9).

Для снижения вычислительной нагрузки на микроконтроллер использовано параллельное выполнение системой управления нескольких функций:

- вычисление ДПФ параллельно с формированием выборки тока во временной области.

- вычисление углового положения ротора и вычисление управляющих воздействий параллельно с формированием фазного тока.

Получены экспериментальные оценки использования ресурсов микроконтроллера. Основные временные показатели для рис.9 при тактовой частоте микроконтроллера 40 МГц приведены в таблице 2.

Указанные временные параметры зависят от производительности микроконтроллера и определяют функциональные возможности ВИП.

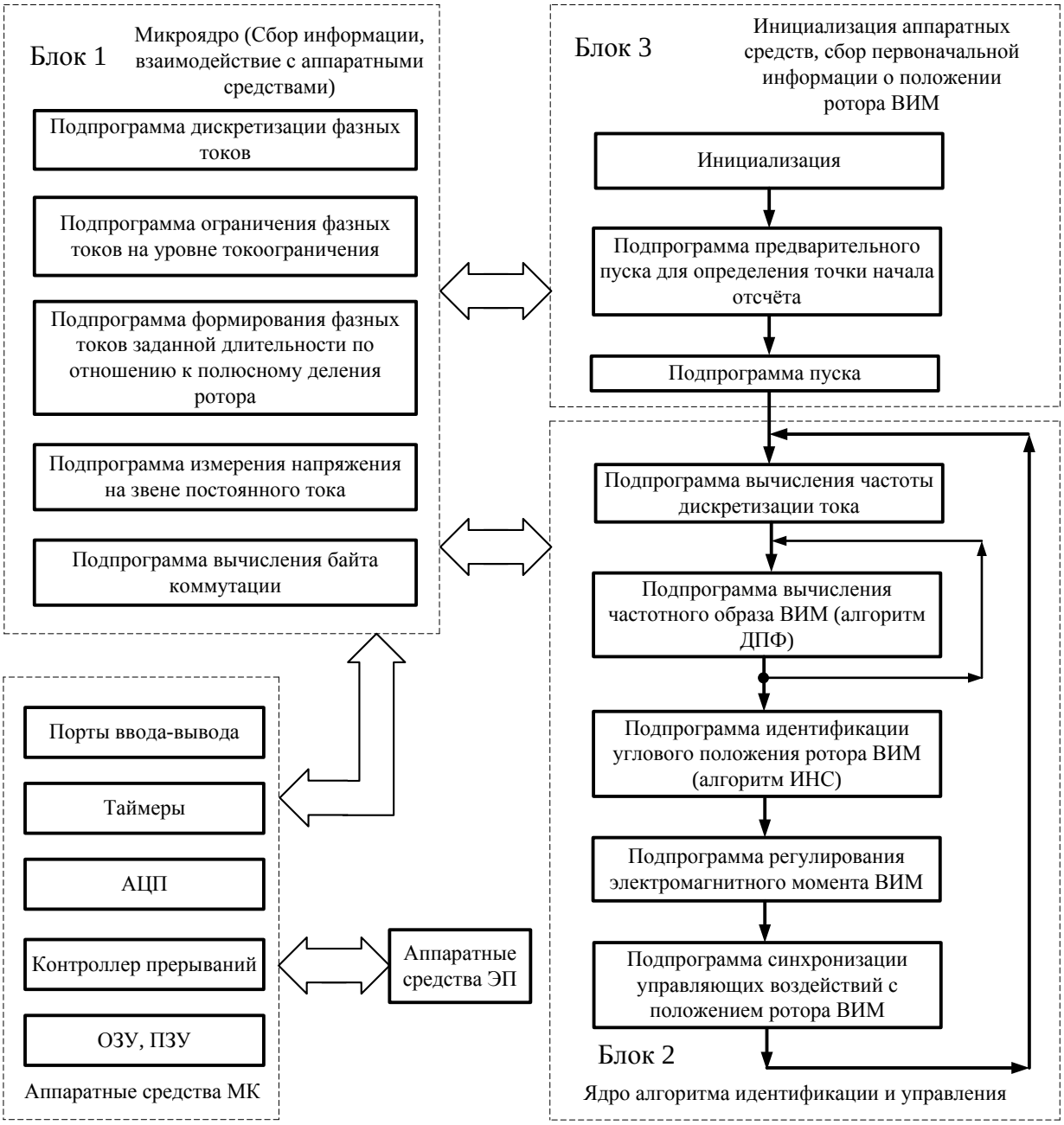

Рис.8. Структура программного обеспечения системы управления ВИП

Экспериментально проверена работоспособность замкнутой системы бездатчикового ВИП с разработанным идентификатором положения ротора ВИМ при разных значениях напряжения питания, уровнях токоограничения и нагрузки на валу ВИМ. Максимальная частота коммутации фаз составляет 350 Гц. Диапазон регулирования 1:6.

Получены механические характеристики бездатчикового ВИП (рис.11). Показано примерное постоянство частоты вращения ротора ВИМ при изменении нагрузки на валу, что достигается применением ПИ-регулятора скорости, а также зависимость максимального электромагнитного момента ВИП от уровня токоограничения.

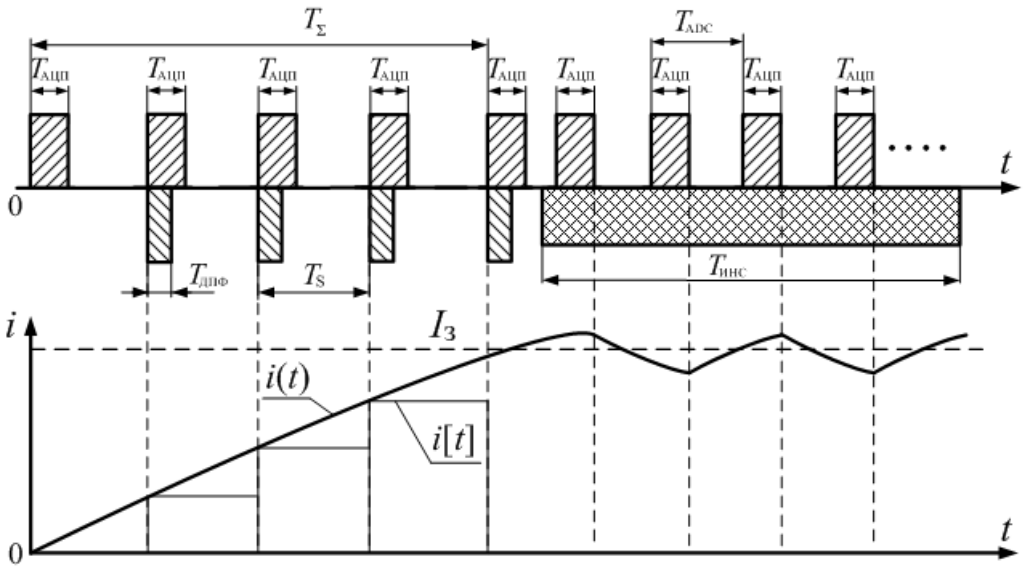

Рис.9. Распределение времени при идентификации углового положения ВИМ: $T_{АЦП}$ – время аналого-цифрового преобразования; $T_{ДПФ}$ – время обработки по алгоритму ДПФ очередного отсчёта тока; $T_{ИНС}$ – время работы алгоритма ИНС; T_S – период дискретизации тока; T_Σ – измерительный участок; N – число точек ДПФ; T_{ADC} – период дискретизации тока в режиме токоограничения

Таблица 2

$T_{АЦП}$, мкс	$T_{ДПФ}$, мкс	T_{Smin}, мкс	$T_{ИНС}$, мкс	N	$T_{\Sigma min}$, мкс	T_{ADC}, мкс
35	25	40	150	8	120	50

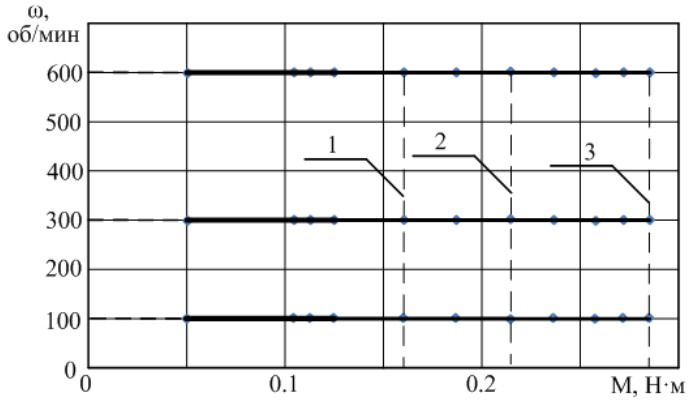

Рис.11. Механическая характеристика разработанного ВИП при различных уровнях токоограничения: 1 – 2.5 А; 2 – 3.0 А; 3 – 3.5 А

<u>В пятой главе</u> сделан обзор электроприводов нагнетателей (насосы, компрессоры, вентиляторы). Показано, что наиболее экономичным способом регулирования производительности нагнетателей является регулирование скорости вращения. Приведены особенности требований к ЭП нагнетателей.

Показано, что экспериментальные оценки диапазона регулирования частоты вращения и ограничения по быстродействию предлагаемой системы удовлетворяют требованиям к ЭП нагнетателей.

Для конкретного применения аппаратные и программные средства ВИП требуют доработки в зависимости от конфигурации вентильно-индукторной

машины, схемы преобразователя, цепей защиты, управления и сигнализации. При этом требуется внести изменения во вспомогательные модули программного обеспечения, а модули, используемые для идентификации углового положения ротора, изменений не требуют и настраиваются на конкретный тип ВИМ путём изменения коэффициентов масштаба.

В заключении обобщены основные результаты и сделаны выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В работе получены следующие основные результаты:

1. Предложена структура бездатчикового ВИП на основе математического аппарата ДПФ и ИНС, реализующая функции управления и идентификации положения ротора. Разработано модульное программное обеспечение для системы управления ВИП на основе микроконтроллера PIC18F2320 фирмы Microchip.

2. Составлена компьютерная имитационная модель, реализующая предложенный алгоритм управления ВИП. Обоснована степень детализации модели и показана адекватность математической модели идентификатора положения и его технической реализации.

3. Разработана экспериментальная установка, реализующая предложенный алгоритм идентификации и управления. Экспериментально проверена работа ВИП при изменении напряжения питания (40 – 120 В), уровня токоограничения (1.0 – 3.5 А) и нагрузки. Максимальная частота коммутации фаз составляет 350 Гц. Диапазон регулирования 1:6.

4. Определены параметры идентификатора углового положения ротора ВИМ, при которых погрешность идентификации углового положения не превышает 7% от протяжённости участка полюсного деления с $dL/d\Theta>0$. ДПФ вычисляется по 8-и значениям тока во временной области. Использована ИНС с одним скрытым слоем с 6-8 нейронами. Для идентификации положения ротора используется набор из 3-х гармонических составляющих.

5. Разработан и реализован алгоритм автоматической настройки идентификатора углового положения ротора ВИМ к изменению напряжения питания и уровню токоограничения без изменения настройки ДПФ и ИНС. Показано, что при изменении напряжения питания в пределах 40 – 120В и уровня токоограничения в пределах 1.0 – 3.5А погрешность идентификации углового положения не превышает 9% от протяжённости участка полюсного деления с $dL/d\Theta>0$. Показан способ настройки идентификатора на различные конфигурации ВИМ без изменения настройки ДПФ и ИНС.

6. Получены экспериментальные оценки использования программно-аппаратных ресурсов микроконтроллера, а именно, временные показатели выполнения задач сбора информации, идентификации и управления.

7. Результаты работы применены в электроприводе канальной вентиляции на НПО «Рубикон-Инновация» (г. Смоленск).

<u>Результаты работы над диссертацией опубликованы в следующих работах:</u>

1. Полющенков И.С., Льготчиков В.В. Бездатчиковый вентильно-индукторный электропривод с элементами искусственного интеллекта//ЗАО «Знак» Электричество – 2012. - №2. – с. 25 – 32.

2. Полющенков И.С. Разработка бездатчикового вентильно-индукторного электропривода. «Информационные технологии, энергетика и экономика». Сборник трудов 8-й Межрегиональной науч.-техн. конференции студентов и аспирантов. В 3-х т. Т. 2. Смоленск: филиал ГОУВПО МЭИ(ТУ) в г. Смоленске, – 2011. – 236 с.

3. Полющенков И.С. Вентильно-индукторный электропривод с искусственной нейронной сетью. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: 17-я Международная науч.-техн. конференция студентов и аспирантов: Тез. докладов. В 3 т. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 644 с.

4. Полющенков И.С. Разработка программного обеспечения вентильно-индукторного электропривода. «Информационные технологии, энергетика и экономика» (электроэнергетика, электромеханика, энергосбережение, теплоэнергетика и теплофизика). Сб. трудов. 7-я Межрег. Науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 3 т. Т 1. Смоленск: филиал ГОУВПО МЭИ(ТУ) в г. Смоленске, – 2010. – 170 с. стр. 63 – 66.

5. Полющенков И.С. Бездатчиковый вентильно-индукторный электропривод. «Энергетика, информатика, инновации-2011» Сб. трудов Междунар. науч-техн. конф. В 2 т. Т.1. Смоленск: РИО филиала ГОУВПО МЭИ(ТУ) в г. Смоленске, 2011. – 302 с.

6. Полющенков И.С. Исследование бездатчикового вентильно-индукторного электропривода. «Энергетика, информатика, инновации-2012» Сб. трудов Междунар. науч-техн. конф. В 2 т. Т. 1. Смоленск: РИО филиала ГОУВПО МЭИ(ТУ) в г. Смоленске, 2012. – 402 с.

7. Полющенков И.С. Компьютерная модель бездатчикового вентильно-индукторного электропривода. «Информационные технологии, энергетика и экономика» (электроэнергетика, электромеханика, энергосбережение, теплоэнергетика и теплофизика). Сб. трудов. 6-я Межрег. Науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 3 т. Т. 2. Смоленск: филиал ГОУВПО МЭИ(ТУ) в г. Смоленске, – 2009. – 93 с.

8. Полющенков И.С. Система управления бездатчиковым вентильно-индукторным электроприводом. «Новые материалы оборудование и технологии в промышленности: материалы». МНТК молодых учёных: – Могилёв: Белорусско-российский университет, 2009. – 176 с.

Печ. л. Тираж Заказ